

# 融雪期における積雪底面流出推定方法の検討

○JR 東日本 外狩麻子 JR 東日本 島村誠 SWR(株) 山口英俊  
パタゴニア生態系研究センター 松元高峰 新潟大学 河島克久

## 1. はじめに

積雪地域では、融雪期に残雪を伴う土砂災害が発生することがある。これは、日射や気温上昇によって積雪の融解が起こり、融雪水が地盤へ多量に供給されることに起因して発生すると考えられる。鉄道沿線でも同様な災害発生は記録されており、近年では 2001 年 3 月に福島県内で残雪を巻き込んだ土砂崩壊、また 2003 年 3 月には長野県内にて融雪にて緩んだ斜面から落石が発生している。

このような融雪期の土砂災害被災を回避するための鉄道事業としての対策としては、降雨時の運転規制を転用して、規制における危険度判断を安全側にスライドさせる取組み（融雪期における規制基準の引き下げ）や、日融雪量を気温から推定して警備・巡回の実施判断に反映させる取組みなど、鉄道線区や地域特性に配慮して実施されている。しかしながら、晴天時に融雪が起こり易いのは事実であり、観測雨量がゼロの時に降雨時運転規制を転用することには限界が生じる。

本研究では、まず基幹的な実データの獲得を目的にして、積雪・融雪に関連する詳細な野外観測を開始している。この観測データを基に、融雪現象および融雪水挙動を定量的に把握して、積雪からの融雪と地盤への積雪底面流出を推定する手法の構築を進めている。積雪由来の融雪水を時系列データとして定量的に推定することができれば、無降水時であっても擬似的な降水量として取り扱うことにより、降雨時運転規制の準用が可能となると考えている。

## 2. 積雪・融雪観測の概要

積雪・融雪に関する観測データを獲得するために、新潟県南魚沼市大白川（標高約 350m）に観測地を設けている。本観測地では 2009 年 12 月時点で、斜面部で 2 機種 2 項目、平地部では 17 機種 60 項目の気象地象観測を実施している(図 1)。このうち融雪状態を直接的に計量することが可能な構造・機能を持つ観測機器は、積雪重量計と融雪ライシメータ及び、土壌水分計である。

積雪重量計は、金属製ピローを降雪前に地表面上に敷設し、受感部上に堆積した積雪の重量を計測する機器である。このため、降雪降雨に関わらず積雪層に含有する水量全体の重量を計測するが、積雪体積や積雪層雪質の変化が生じて、積雪層全体としての重量が変化しなければ測定値には反映されない。融雪ライシメータは、大型プレートを手表面高さに上端部を合わせて埋設し、プレート上の積雪底面から流出する融雪水を集導水して計測する機器である。プレート面積が小さいと計測誤差が大きくなる一方、面積を大きくすると分解能の大きな計測機器の使用となるため、融雪現象の発現と計測との間にタイム・ラグが生じる原因となる。土壌水分計は、埋設した深さにおける土の体積含水率を誘電率として計測する機器である。本観測地の地域では、厳冬期でも継続的な計測が可能である。上述のように、測定データの取扱や処理・分析にあたっては、直接的な計測であっても、具体的に観測機器が何を捉えているか、融雪現象のどの成分であるか、に十分に留意する必要がある。

## 3. 積雪底面流出メカニズムの捉え方

日射及び気温上昇や降雨によって積雪層に熱エネルギーが与えられることで、積雪表面で融解が生起する。この融雪水は積雪層内で拡散・浸潤あるいは重力により下方浸透するが、この移動中に周辺の雪氷により熱を奪われ、積雪層内にて再氷結する場合もある。再氷結せずに積雪層底部に達した融雪水は積雪底面流出として、積雪と地表面の境界に供給される。すなわち、積雪底面流出が、融雪期における「無積雪期の降雨による観測雨量」と同等に相当する擬似的な降水量といえる。

## 4. 積雪底面流出量の推定

### 4. 1 熱収支法と積雪層浸透モデルによる推定

熱収支法で積雪の表面融雪量を推定し、続いて、積雪層浸透モデルで積雪底面流出量を推定する。ここでは、熱収支法として Konya ら<sup>1)</sup>の提案式を採用している。表面融雪量： $M$  は、 $T_a$ ：気温(°C)と  $S_b$ ：全天日射量(W/cm<sup>2</sup>)

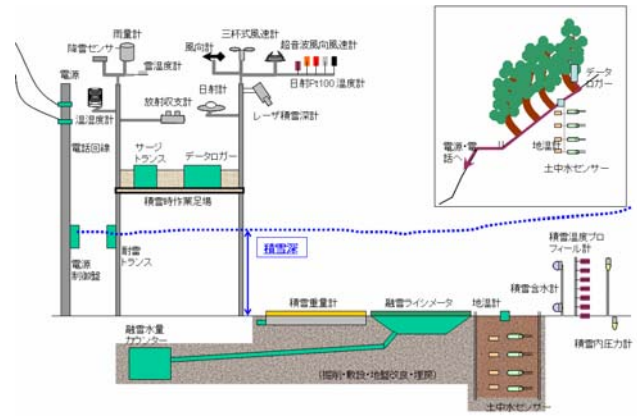


図 1 大白川観測地での観測状況（模式図）

より、下記の式にて算出される。

$$M(t) = aT_a(t) + bS_d(t) + c \quad \dots(1)$$

2008-09 年の大白川観測地データを使用して、提案式(1)の 3 つの係数を重回帰分析にて決定した。

次に、この融雪水が積雪層内部を下方浸透して積雪底面流出となるモデルとして、中津川ら<sup>2)</sup>の提案した線形貯留関数モデルを使用して、

$$R_0(t) = R_0(t-1)e^{-\frac{1}{k_0}} + I_w(t) - I_w(t)e^{-\frac{1}{k_0}} \quad \dots(2)$$

$$I_w(t) = M(t) + P_r(t) \quad I_w(t) = M(t) + P_r(t) \quad \dots(3)$$

$R_0$ : 積雪底面流出量(mm)、 $P_r$ : 雨量(mm)、 $D_s$ : 積雪深(cm)、 $I_w$ : 水フラックス(mm)、 $k_0$ : 係数とした。係数  $k_0$  の算定式(3)は、2007~2009 年までの大白川観測地での積雪深データを使用して回帰式を次のようにした。

$$k_0 = 0.0807D_s \quad \dots(4)$$

2007-08 年融雪期の大白川観測地での気象観測データを用いて、積雪底面流出の推移を推定した<sup>3)</sup>。積雪重量計の実測値  $W$  の重量減少分( $W_i - W_{i-1}$ )と積雪底面流出量の推定値を図 2 に示す。融雪最盛期の傾向は掌握しているが、定量的に良好な推定と判断するには未だ改善の余地がある。

#### 4. 2 降水量と気温による解析学的推定

多くの観測実施項目から、積雪底面流出量推定に影響を及ぼす因子を特定し、観測データ時系列から推定ができるような関数式の検討とその諸係数の最適化を試みた。積雪底面流出が生起すれば積雪重量は減少し、逆に、降雪降水があれば積雪重量は増加するという、シンプルな物質変化を推定式の支配方程式とした。

$$W_i = W_{i-1} + \Delta w1 + \Delta w2 \quad (5)$$

$\Delta w1 = k1R_i^{n1}$  ただし、 $T > t1$  では  $\Delta w1 = 0$  , また  $\Delta w2 = k2T_i^{n2}W_{i-1}$  ただし、 $T < t2$  では  $\Delta w2 = 0$

$W_i$ : 推定積雪重量(kg/m<sup>2</sup>)、 $W_{i-1}$ : 前の推定積雪重量(kg/m<sup>2</sup>)、 $\Delta w1$ : 推定増加量(kg/m<sup>2</sup>)、 $\Delta w2$ : 推定減少量(kg/m<sup>2</sup>)、 $R_i$ : 降水量(mm)、 $T_i$ : 気温(°C)、 $k1, k2$ : 係数、 $t1, t2$ : 気温定数、 $n1, n2$ : 次数とした。10 分ピッチの観測データを使用して、係数・気温定数・次数の 6 つを遺伝的アルゴリズムで最適化した。

2008-09 年の大白川観測地での積雪重量の実測値と式(5)による推定値を図 3 に示す。この全体系での推定が認められれば、推定式(5)は実現象と整合性が取れていると判断でき、式(5)の各項  $\Delta w1$  と  $\Delta w2$  も合理的であると解釈できる。重量増加分  $\Delta w1$  と重量減少分  $\Delta w2$  を図 5 に示す。重量減少分  $\Delta w2$  として推定された時系列数値が融雪水量の解析的推定値となる。積雪層内の積雪・融雪水の各成分が推定できることになり、これは観測だけでは分離できない融雪水の成分であり、他の冬期データでも同様に確立できれば画期的な手法となりうる。

#### 5. 今後の課題

積雪重量を主体とした積雪底面流出の推定を 2 つの異なる理論に基づく推定式にて実施した。今後は、無雪期とは異なる、地中への浸透水供給現象に依存する土中水変化や分布傾向などを分析していく。

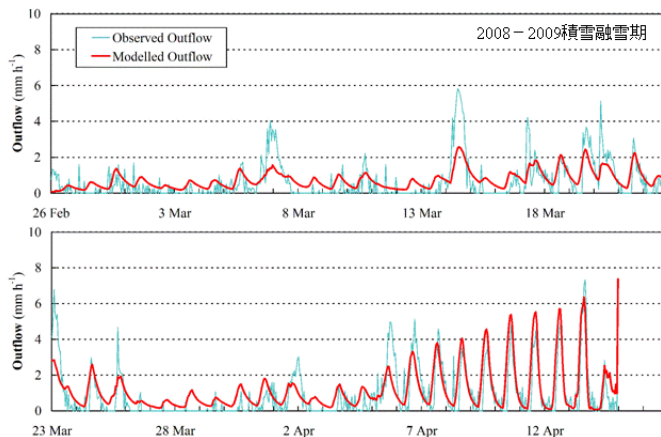


図 2 表面融雪モデルと積雪層浸透モデルによる推定



図 3 積雪重量の実測値と解析的モデルによる推定

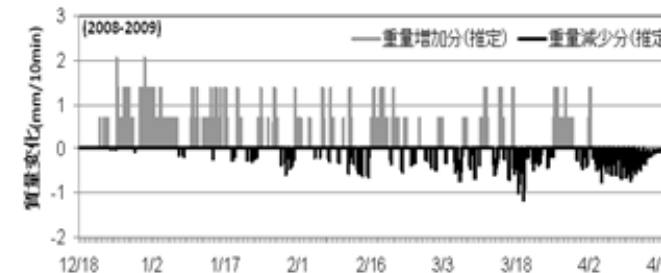


図 4 積雪重量推定における増加分と減少分

[参考文献] 1) Konya, K., et. al.: Surface heat balance and spatially distributed ablation modeling at Koryto Glacier, Kamchatka Peninsula, Russia, Geografiska Annaler, 86A, 337-348, 2004, 2) 中津川ら: 積雪貯留を考慮した汎用的な融雪流出解析, 水工学論文集, vol.48, 37-42, 2004.2, 3) 松元ら: 気温・日射量を指標とする表面融雪モデルと積雪層浸透モデルとを組み合わせた積雪底面流出量の推定, 雪氷学会誌, 2010.7(投稿中)